

# ДИЭЛЬКОМЕТРИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

## 1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ

Ю.Г.Подкин, Т.Г.Чикуров

Ижевский государственный технический университет, Сарапульский филиал  
427900, Удмуртская Республика, Сарапул, Труда, 8

Показана эффективность диэлькометрии как метода контроля дисперсных систем. Выявлены причины, снизившие скорость развития этого метода. На основе теорий систем и решений предложены три метода повышения информативности диэлькометрии: скоростной, градиентный и частотный. Определены потенциальная информативность и области применения этих методов. Исследованы корреляционные связи между новыми каналами измерений и даны рекомендации по системному проектированию диэлектрических средств контроля нестационарных дисперсных систем.

**Подкин Юрий Германович** – заведующий кафедрой “Конструирование и производство радиоаппаратуры” (КиПР) Сарапульского филиала Ижевского государственного технического университета (СФИЖГТУ), кандидат технических наук, доцент.

Область научных интересов: диэлькометрия гетерогенных дисперсных систем.

Автор более 70 научных статей и публикаций.

**Чикуров Тимофей Георгиевич** – аспирант кафедры “Конструирование и производство радиоаппаратуры” (КиПР) Сарапульского филиала Ижевского государственного технического университета (СФИЖГТУ).

Область научных интересов: диэлькометрия гетерогенных дисперсных систем.

Автор 1 статьи и 2 тезисов.

### Введение

Арсенал методов и средств лабораторного анализа состава и свойств веществ, материалов и изделий весьма обширен и постоянно наращается. Но далеко не все из них применимы в системах операционного и интегрального технологического контроля. Специфика технологического оборудования и многообразие производственных операций накладывают на устройства контроля множество ограничений. Особенно жесткие требования предъявляются к средствам контроля нестационарных объектов, в которых протекают физико-химические процессы. В этом случае обычно предпочтение отдают экспрессным неразрушающим способам измерения, в которых микроструктура и процессы, протекающие в веществе на микроуровне, феноменологически от-

ражаются величинами, легко преобразуемыми в электрические сигналы.

Этим требованиям вполне отвечает *диэлькометрический метод* контроля (*диэлькометрия*). Он базируется на обменном взаимодействии электрического поля и вещества, обладает высокой чувствительностью к микроструктурным факторам, реализуется достаточно простыми техническими средствами, имеет высокое быстродействие, применим в широком интервале температур. Особенно удобна диэлькометрия как метод исследования и контроля дисперсных систем с фазами, находящимися в любом агрегатном состоянии.

Собственно диэлькометрия позволяет измерять составляющие диэлектрической проницаемости и их отношения в широком интервале час-

тот, энергетических воздействий и температур. Однако косвенно диэлектрические характеристики связаны с физико-механическими и химическими свойствами материалов: составом, структурой, упаковкой, плотностью, степенью полимеризации, стадией превращения и т.д. Это широко используется в исследовательской практике прежде всего для измерения физических величин: дипольных и мультипольных моментов, поляризуемости, констант флюктуационных эффектов, постоянных Керра и электростатического эффекта Поккельса, времен релаксации, констант взаимодействия и комплексообразования [1, 2].

Эффективна диэлькометрия и как метод качественного анализа. В частности, диэлькометры применяются для идентификации вещества, определения степени чистоты образца, концентрации компонентов гетерогенных объектов. Высокое быстродействие диэлькометров, ограничиваемое в основном временами релаксации, позволяет их использовать для исследования кинетических явлений, измерения скоростных характеристик химических реакций и процессов структурирования, исследования механизмов старения, прогнозирования свойств материалов на длительную перспективу. Тесная связь микроскопических факторов и их макроскопических проявлений, лежащая в основе диэлькометрии, используется для исследования анизотропии материалов, выявления дефектов.

В системах контроля встречаются разнообразные диэлектрические средства измерения: измерители геометрических характеристик, дефектоскопы, средства испытания материалов при воздействии на них различных факторов, концентратомеры. Но наиболее широко диэлектрический метод используется в системах влагометрии. Это, с одной стороны, привело к расширению номенклатуры и развитию всех технических средств, обеспечивающих высокие эксплуатационные показатели диэлектрических влагомеров, но с другой – оказалось маскирующим фактором, затмившим иные применения диэлькометрии.

### Постановка задачи

Пик развития диэлькометрии пришелся на восьмидесятые годы. В девяностых годах было достигнуто насыщение используемых методов получения и обработки информации по чувствительности, точности, информативности и резкое сокращение новых разработок диэлектрических средств. Так, в частности, по данным лаборатории прикладной акваметрии Уральского

научно-исследовательского института метрологии, курирующей метрологическое обеспечение влагомеров в России, сейчас готовятся к выпуску лишь два-три типа новых влагомеров, причем их метрологические характеристики лишь повторяют уже достигнутые показатели.

Возник своеобразный ступор в развитии диэлькометрии, опасный тем, что новые компьютеризированные измерительные технологии, базирующиеся, порой, на сомнительных физико-химических принципах, но дополненные тщательной математической обработкой, удобным и понятным представлением информации, могут вытеснить этот ценный метод.

Изучение тенденций развития современных методов и средств измерения показало, что основной вклад в улучшение их метрологических свойств и придание нового качественного уровня измерительной технике обеспечивается, главным образом, за счет резкого углубления степени переработки измерительной информации [3,4]. Поэтому для создания нового конкурентноспособного поколения диэлектрической техники необходимо:

- 1) выбрать объект контроля, наиболее перспективный в информационном плане – информационно-полный объект (ИПО);
- 2) на основе анализа физического принципа действия диэлектрического преобразователя определить потенциальную информативность по отношению к ИПО;
- 3) разработать алгоритмы формирования потоков измерительной информации, обеспечивающие максимизацию информационного КПД реальных объектов.

### Методология

Оптимизировать диэлектрический метод по информационному КПД можно только путем системного анализа ИПО и процедур формирования информационных потоков. Эти требования лучше всего обеспечивают системология [3], теория решений [4], теория информации [5].

Система считается функционально полной, если описывается, с одной стороны, совокупностью и свойствами элементов, с другой – отношениями между ними [3]. Основной подсистемой любой системы контроля является первичное преобразование, обеспечивающее формирование информативных сигналов о контролируемом объекте. Системный подход требует, чтобы эта подсистема отражала свойства элементов контролируемого объекта и их отношения.

Однако до сих пор, при построении систем кон-

троля, использовался ограниченный, утилитарный подход, при котором выделялся только один из системных признаков. Это не только снижало информативность системы контроля, но часто приводило к их, казалось бы, немотивированным отказам. Поэтому при выборе концепции построения системы контроля целесообразно, в первую очередь, на основе теории оптимальных решений оценить эффективность функционирования системы по критериям минимума среднего риска для двумерного ортогонального потока сигналов [2]. И если средний риск одномерного приближения превышает заданный порог эффективности, следует переходить к двумерной системе контроля, в которой структурный канал формирует поток информации об элементах системы, а канал отношений – о механизмах и кинетике их взаимодействия. Для определения количества информации в потоках лучше всего использовать шенноновский подход [5], а выбор ИПО провести на основе сравнения объектов контроля.

В химических, сельскохозяйственных, пищевых, биологических производствах, строительстве широко распространены дисперсные системы как объекты переработки. В информационном плане дисперсные системы уникальны. Их фазы могут быть образованы наиболее широким набором элементов – от газообразной матрицы до биологических клеток, а физико-химические процессы, протекающие в системах, определяют максимальный спектр отношений. Поэтому наиболее логично в качестве ИПО использовать модельную нестационарную дисперсную систему.

### Физический принцип действия

Физическая основа построения диэлькометрических систем контроля базируется на взаимосвязи электромагнитного поля с составом и свойствами материала. Электрическая составляющая электромагнитного поля  $\mathbf{E}$  возбуждает в материале вихревое магнитное поле  $\mathbf{H}$ , которое связано с токами проводимости  $\mathbf{J}_{\text{пр}}$  и смещения  $\mathbf{J}_{\text{см}}$  соотношением

$$\text{rot } \mathbf{H} = (\mathbf{J}_{\text{пр}} + \mathbf{J}_{\text{см}}) = \chi \cdot \mathbf{E} + \partial \mathbf{D} / \partial t = \mathbf{J}, \quad (1)$$

где  $\chi$  – удельная проводимость системы,  $\mathbf{J}$  – вектор полного тока, а вектор электрического смещения переменного электрического поля напряженностью  $\mathbf{E}$  задается материальным уравнением

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon' \cdot \mathbf{E}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость, численно равная  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ,  $\epsilon'$  – диэлектрическая проницаемость вещества,  $\mathbf{J}_{\text{см}}$  склады-

вается из так называемого [6] чистого тока смещения  $\mathbf{J}'_{\text{см}}$ , не связанного со сквозным движением зарядов и тока  $\mathbf{J}''_{\text{см}}$ , учитывающего макроскопический перенос зарядов. Феноменологически  $\mathbf{J}_{\text{см}}$  может рассматриваться как часть тока проводимости. Ток смещения отличается от тока проводимости тем, что характеризует обратимый обмен энергиями тока с полем и не выделяет джоулева тепла. Для проводящих сред, например растворов электролитов, плотность тока смещения обычно мала по сравнению с плотностью тока проводимости, в диэлектриках, наоборот,  $\mathbf{J}_{\text{см}} > \mathbf{J}_{\text{пр}}$  поэтому соотношение  $\mathbf{J}_{\text{см}} / \mathbf{J}_{\text{пр}} \gg 1$  – один из признаков диэлектрической среды, а при  $\mathbf{J}_{\text{см}} \approx \mathbf{J}_{\text{пр}}$  среда может считаться полупроводящей.

Из (1) и (2) в гармонических полях  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_m \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}$  ( $\omega$  – угловая частота поля) следует:

$$\mathbf{J} = \chi \mathbf{E} + j \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon' \cdot \mathbf{E} = \chi^* \cdot \mathbf{E}, \quad (3)$$

где комплексная удельная проводимость

$$\chi^* = \chi + j \cdot \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon' \quad (4)$$

параметром  $\chi$  отражает гетерогенную диссипацию энергии поля веществом, а реактивной составляющей – процессы поляризации.

В теории и практике измерений часто используется квадратурное представление электрофизических свойств (4). Если разделить левую и правую части выражения (4) на  $j \omega \epsilon_0$ , то реакцию вещества на электрическое поле можно представить комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\epsilon^* = -j \cdot (\chi^* / (\omega \cdot \epsilon_0)) = \epsilon' - j \cdot (\chi / (\omega \cdot \epsilon_0)) = \epsilon' - j \cdot \epsilon'', \quad (5)$$

где  $\epsilon'$  характеризует обратимый обмен энергией поля и вещества, а  $\epsilon''$  – диссипацию, обусловленную сквозной проводимостью и релаксационными процессами. Кроме того, в диэлькометрии используется комбинированный параметр – тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg} \delta = \epsilon'' / \epsilon'$ , который инвариантен относительно первичного измерительного преобразования.

В дисперсных системах составляющие комплексной диэлектрической проницаемости (ДП)  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  функционально связаны с количеством, составом и качеством фаз, а также физико-химическими процессами, протекающими в системах. Это и используется в качестве физической основы построения диэлькометрических информационно-измерительных систем.

### Оценка потенциальной информативности

Основной причиной, ограничивающей возможности диэлькометрического метода, оказа-



лась традиция одноканального формирования измерительной информации. Поэтому средства, применяемые для исследования дисперсных систем, уже сейчас в большинстве своем используются с предельной информативностью. Дальнейшее расширение технологического применения диэлькометрии требует создания новых информационно-канальных систем.

Оценим потенциальную информативность диэлькометрии дисперсных систем для случая идеализированного измерительного преобразования.

Поскольку составляющие комплексной ДП в таких диссипативных дисперсных системах имеют различную физическую природу, их раздельное измерение, т.е. формирование двух информационных потоков в системном плане эквивалентно созданию двух ортогональных групповых каналов измерения [7]. Причем каждая из групп образуется бесконечным количеством парциальных каналов.

Пусть измеряются раздельно и независимо действительная  $\epsilon'$  и мнимая  $\epsilon''$ , составляющие ДП. В идеализированном случае, то есть при отсутствии влияющих воздействий и помех в канале преобразования, их дифференциальные энтропии определяются плотностями вероятности  $W(\epsilon')$  и  $W(\epsilon'')$  каждой из составляющих [5], то есть:

$$h(\epsilon') = - \int_{-\infty}^{\infty} W(\epsilon') \log W(\epsilon') d\epsilon'$$

$$h(\epsilon'') = - \int_{-\infty}^{\infty} W(\epsilon'') \log W(\epsilon'') d\epsilon''$$

а совместная дифференциальная энтропия равна:

$$h(\epsilon', \epsilon'') = h(\epsilon') + h(\epsilon'') \quad (6)$$

где условная дифференциальная энтропия

$$h(\epsilon', \epsilon'') = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W(\epsilon', \epsilon'') \log W(\epsilon', \epsilon'') d\epsilon' d\epsilon'' \quad (7)$$

При полной статистической независимости функций  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  значение  $\eta(\epsilon', \epsilon'') = \eta(\epsilon'')$  и совместная дифференциальная энтропия равна сумме энтропий каждого канала измерения. Однако, обычно функции  $W(\epsilon')$  и  $W(\epsilon'')$  коррелированы, поэтому совместная дифференциальная энтропия меньше суммы парциальных энтропий и, при их полной функциональной зависимости, информативность двухканальных систем формирования измерительной информации вырождается до уровня одноканальной.

Информативность диэлькометрии может быть значительно повышена при анализе нестационарных дисперсных систем. Возможны три пути повышения информативности. Наиболее просто вводятся в качестве информативных скоростные характеристики составляющих ДП  $\frac{d\epsilon'}{dt'}$ ,  $\frac{d\epsilon''}{dt''}$ , т.е.

моменты базовых величин, где  $l$  - порядок производной. Для реализации такого мультипликативного метода может использоваться типовая структура первичного и вторичного измерительного преобразования, а дополнительная информация формируется путем математической обработки континуальных сигналов за достаточный период времени  $T$ . Наиболее эффективно этот метод используется для исследования и технологического контроля нестационарных дисперсных систем типа эмульсий и растворов. Продолжительность анализа измерительной информации определяется кинетическими характеристиками протекающих в них процессов.

Еще одна возможность мультиплицирования измерительных каналов возникает в анизотропных средах. В этих случаях временное сканирование заменяется пространственным [2] и дополнительные информационные каналы формируются градиентами диэлектрических величин.

Третий путь состоит в частотном сканировании составляющих ДП, т.е. анализе функций  $\epsilon'(\omega)$ ,  $\epsilon''(\omega)$  и их моментов. Для реализации этого метода необходим развертывающий в частотной области измерительный преобразователь, что усложняет метод, зато он оказывается применимым и для анализа стационарных и квазистационарных систем.

Из-за нелинейности и нестационарности дисперсных систем временное и частотное разложение функции ДП не адекватны, поэтому Фурье-спектроскопия может использоваться только для решения узкого класса задач или как самостоятельный комплексный метод исследования.

Дополнительную информацию о дисперсных системах можно получить в режиме внешних воздействий: механических (уплотнение, вибрация, сбрасывание, кипящий слой и т.д.), тепловых, электрических, магнитных, волновых, радиационных и т.д. В этом случае усложняется первичное измерительное преобразование, вторичные преобразователи организуют по первому способу, а исследуемые свойства существенно зависят от алгоритма и динамического диапазона воздействия.

Но мультиплицирование информационно-измерительных каналов повышает информативность диэлькометрии нелинейно. Положим, что каждый парциальный канал наблюдения обладает максимальной информативностью, то есть контролируемое свойство, отображаемое обобщенным параметром  $x_l$ , описывается гауссовским распределением плотности вероятности [5]. Тогда по (6) и (7) энтропия диэлькометрической системы для  $n$  каналов измерения равна:

$$h(x_1, x_2, \dots, x_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} W(x_1, x_2, \dots, x_n) \log W(x_1, x_2, \dots, x_n) \prod_{i=1}^n dx_i, \quad (8)$$

где  $x_i$  -  $i$ -е свойство системы, а  $n$ -мерная функция плотности распределения определяется выражением [6]

$$W(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \det[\Lambda_{jk}]}} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \Lambda_{jk} \cdot (x_j - \xi_j) \cdot (x_k - \xi_k) \right], \quad (9)$$

где  $[\Lambda_{jk}] = [\lambda_{jk}]^{-1}$  - матрица моментов,  $\xi_j$  - центры моментов свойств.

Центральные моменты второго порядка  $\lambda_{jk}$  при  $j=k$ , т.е. ковариация  $\text{cov}\{x_j, x_k\}$ , задают матрицу моментов  $[\lambda_{jk}]$ , определитель которой  $\det[\lambda_{jk}]$  является обобщенной дисперсией  $n$ -мерного распределения [8]. Но поскольку и свойства  $x_i$  взаимно коррелированы, можно ввести обобщенные коэффициенты взаимной корреляции через математическое ожидание  $M$ :

$$\rho_{jk} = \rho(x_j, x_k) = \frac{\lambda_{jk}}{\sqrt{\lambda_{jj} \lambda_{kk}}} = M \frac{x_j - \xi_j}{\sigma_j} \cdot \frac{x_k - \xi_k}{\sigma_k}, \quad (10)$$

(j, k = 1, 2, ..., n)

Коэффициенты корреляции многомерного распределения образуют корреляционную матрицу  $[\rho_{jk}]$ , которая существует только при среднеквадратических парциальных отклонениях  $\sigma_j$ . В нашем случае существенную роль для оценки информативности диэлькометрии имеет коэффициент разброса, который вводится через матрицу моментов и парциальные дисперсии  $\sigma_j^2$ .

$$\det[\rho_{jk}] = \frac{\det[\lambda_{jk}]}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 \dots \sigma_n^2}. \quad (11)$$

Таким образом, в многоканальном приближении информативность диэлькометрии нестационарных дисперсных систем, при отсутствии помех, в основном определяется корреляционными функциями каналов измерения. Снижение коэффициента корреляции  $\rho_{jk}$  означает ослабление взаимосвязи информативных потоков между каналами измерения или уменьшение энергии взаимодействия, что увеличивает информативную насыщенность каждого из каналов.

Для выбора рабочих частот по каждому из информационных потоков нужно задать пороговое значение коэффициента корреляции  $R_{jk}$  и сканировать те частоты, на которых текущее значение  $\rho_{jk}$  достигает порога.

### Оптимизация каналов измерения

Каждый дополнительный канал измерения требует увеличения материальных затрат. Отсюда следует, что дополнительные каналы измерения следует вводить только в тех случаях, когда экономические факторы перекрываются информационными. Оценка [7] показывает, что в стационарных дисперсных системах с квазиизотропными фазами оптимальный риск [4] обеспечивается при раздельном измерении вещественной  $\epsilon'$  и мнимой  $\epsilon''$  составляющих комплексной диэлектрической проницаемости.

Инвариантное преобразование частотных характеристик  $\epsilon'(\omega)$  и  $\epsilon''(\omega)$  в их сигналы обеспечивает увеличение информационной производительности, а максимум количества информации достигается при нормальном распределении обрабатываемых технологических свойств контролируемого объекта. Однако в техническом плане переход от фиксированных частотных каналов к непрерывным приводит к непропорциональному росту сложности реализации и количества информации, так как их диэлектрические спектры сильно коррелированы. Поэтому во втором поколении диэлькометров ограничиваются двумя информационными каналами на одной фиксированной частоте или в выделенной частотной области, теряя при этом от 80 до 90% информации.

В качестве компромисса можно ввести два фиксированных частотных канала для каждой диэлектрической характеристики. Материальные затраты при этом возрастут ориентировочно в четыре раза. Для оптимизации разброса частот оценим степень корреляции информационных каналов на основе Максвелл-Вагнеровских представлений диэлектрических спектров [9]:

$$\epsilon^*(\omega\tau) = \epsilon_x + \frac{\epsilon_s - \epsilon_x}{1 + j\omega\omega\tau} + \frac{\chi_s}{j\omega\omega\tau}, \quad (12)$$

$$\chi^*(\omega\tau) = \chi_x + \frac{\chi_s - \chi_x}{1 + j\omega\omega\tau} + j\omega\omega\tau \epsilon_x, \quad (13)$$

где  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_s$ ,  $\chi_x$ ,  $\chi_s$  - ДП и удельная проводимость в оптическом и инфранизком диапазонах частот, соответственно  $\tau$  - время релаксации любой природы. При этом для моделирования корреляционных функций **B** воспользуемся нормированием свертки спектра со смещенным спектром на среднюю мощность спектра  $\sigma^2$ .

$$B_\epsilon = \frac{\int_0^{\Omega} \epsilon^*(\omega\tau) \epsilon^*((\omega+\Omega)\tau) d\Omega}{[\sigma_\epsilon(\omega\tau) \sigma_\epsilon((\omega+\Omega)\tau)] \Omega}, \quad (14)$$

$$B_\chi = \frac{\int_0^{\Omega} \chi^*(\omega\tau) \chi^*((\omega+\Omega)\tau) d\Omega}{[\sigma_\chi(\omega\tau) \sigma_\chi((\omega+\Omega)\tau)] \Omega}. \quad (15)$$

Здесь  $\omega$  – нижнее опорное значение частоты, а  $\Omega$  и  $\Omega_1$  – текущий и фиксированный частотные разносы между низкочастотным и высокочастотным каналами измерения.

Компьютерный анализ (14) и (15) показывает, что при таком подходе легко формировать фиксированные частотные измерительные каналы, оптимизированные по разному частот  $\Omega_1$ . Кроме того, при выводе информации на компьютер сама операция нормирования может использоваться как дополнительный интегральный информационный канал.

В частности, расчет показывает, что при времени релаксации порядка 0.001 с, характерном для межфазной поляризации в коллоидных системах и мелкодисперсных суспензиях, при разном низкочастотного и высокочастотного каналов измерения по частоте на 10, 100, 1000 Гц степень корреляции имеет значения соответственно 0.95, 0.1, 0.01. В первом случае ввод дополнительного канала не оправдан, во втором – новый канал измерения повышает информативность на 90 %, но возникнут проблемы с фильтрацией сигналов. При частотном разном на три порядка количество информации практически удваивается, удовлетворительная частотная фильтрация обеспечивается уже фильтрами первого порядка, вместе с тем высшая рабочая частота еще не выходит из рабочей области современных широкополосных операционных усилителей, что позволяет строить достаточно высокоинформативные двухчастотные информационно-измерительные диэлькометрические системы с оптимальным разномом частот по техническим, технологическим и информационным критериям.

Часто на одной из рабочих частот, обычно низшей, составляющие комплексной диэлектрической проницаемости оказываются сильно коррелированы. В этом случае достаточно ограничиться трехканальным измерительным преобразованием. Причем в качестве информативного параметра в сильно коррелированном канале

можно использовать любую из составляющих диэлектрической проницаемости или комбинированный параметр  $\tau, \text{tg}\delta$ .

### Выводы

1. Минимальное количество информации имеет одноканальное измерительное преобразование в режиме единичной выборки  $\epsilon'$  или  $\epsilon''$ .

2. Введение двух ортогональных каналов по  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  увеличивает количество информации вдвое при коэффициенте корреляции порядка 0.01.

3. Использование двух пар измерительных каналов по  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$ , разнесенных по частоте оправдано, если каждая ортогональная пара  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  слабо коррелированы, а разность частот превышает ширину релаксационной области. Если на одной из выбранных частот  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  сильно коррелированы, на этой частоте достаточно ограничиться одним каналом измерения по любому из параметров:  $\epsilon', \epsilon'', \tau, \text{tg}\delta$ .

4. В нестационарных дисперсных системах наиболее резкое увеличение количества информации обеспечивает скоростной канал, при условии его слабой корреляции с основными каналами.

5. Наибольшее количество информации диэлькометрический метод обеспечивает при контроле дисперсных диссипативных нестационарных систем с анизотропными фазами. В этом случае можно сформировать три группы из ортогональных пар информационных потоков. Первая группа потоков образуется функциями  $\epsilon'(\omega_i)$  и  $\epsilon''(\omega_i)$ . Частотное сканирование внутри групп производится по достижении коэффициентом корреляции заданного порогового значения.

6. В одноканальном и двухканальном приближении обработка информации возможна с помощью жесткой логики. В трех-четырех – канальном варианте затраты минимальны при использовании встраиваемого микроконтроллера. При большем числе каналов наиболее целесообразен вывод информации на компьютер.

### ЛИТЕРАТУРА

- Потапов А.А., Гудков О.И. Метрологическое обеспечение средств измерений диэлектрической проницаемости. М.: Госстандарт СССР, СФ ВНИИФТРИ, ВНИИКИ, 1978. 56 с.
- Матис И.Г. Электроемкостные преобразователи для неразрушающего контроля. Рига: ЗИНАТНЕ, 1982. 304 с.
- Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. М.: Радио и связь, 1990. 539 с.
- Купер Дж. Р. Теория решений//Справочник по системотехнике/ Под ред. Р.Макола. М.: Советское радио, 1970. 677 с.
- Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1986. С. 401-419.
- Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976. 504 с.
- Подкин Ю.Г. Оценка потенциальной информативности диэлькометрии дисперсных систем // Информационные технологии в инновационных проектах: Материалы докладов международной конференции/ Под ред. Б.А.Якимовича. Ижевск: ИжГТУ, 1999. С. 48-51.
- Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 831с.
- Ханаи Т. Электрические свойства эмульсий // Эмульсии. Л.: ГМИ, 1972. С.363-382.

\* \* \* \* \*